Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 107/108 (1936)
Heft: 2

Artikel: Le problème des vagues
Autor: Favre, Henry
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-48330

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Le problème des vagues.

Par HENRY FAVRE,
Dr. ès Sc. techn., Zurich.

(Suite et fin de la page 4.)

4. Le problème des vagues se propageant dans une eau de profondeur finie.

Nous supposerons la pente du fond suffisamment faible pour qu'on puisse considérer la profondeur comme constante sur un certain parcours des vagues. Au *point de vue théorique*, le problème est le même que celui des ondes de surface, sauf que les molécules d'eau, au lieu d'être assujetties à la condition d'être immobiles au-delà d'une certaine profondeur, doivent se déplacer horizontalement au voisinage du fond.

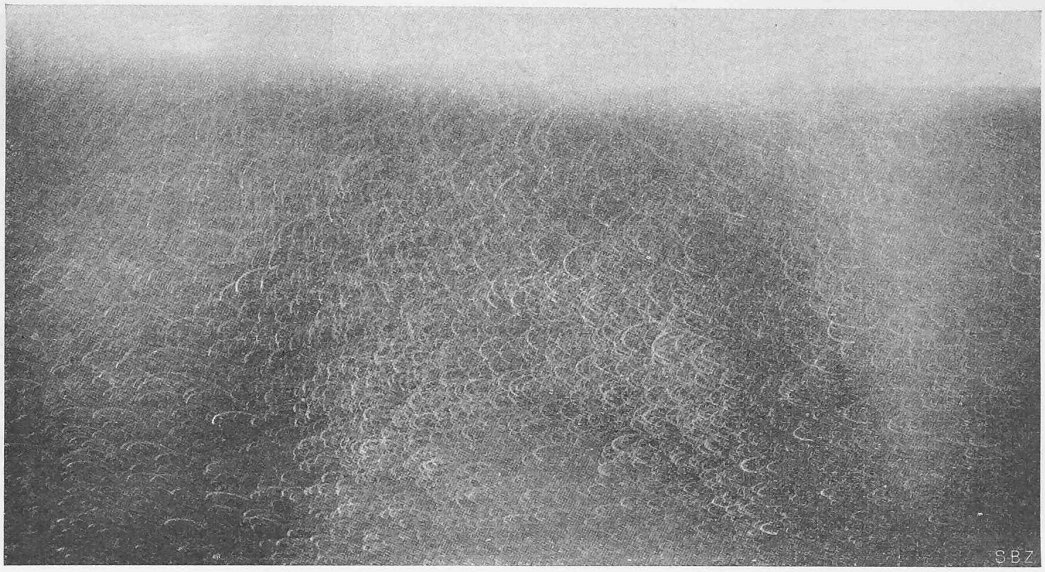

Fig. 10. Ondes par profondeur finie. Trajectoires des particules d'après une expérience d'Ahlborn.

Une première solution *approchée* de ce problème a été donnée par *Airy*, dans un remarquable mémoire intitulé «Tides and waves», édité pour la première fois en 1842. Comme on en trouve l'origine dans un mémoire présenté en 1775 par *Laplace* à l'Académie des Sciences, nous la désignerons sous le nom de *Laplace-Airy*.

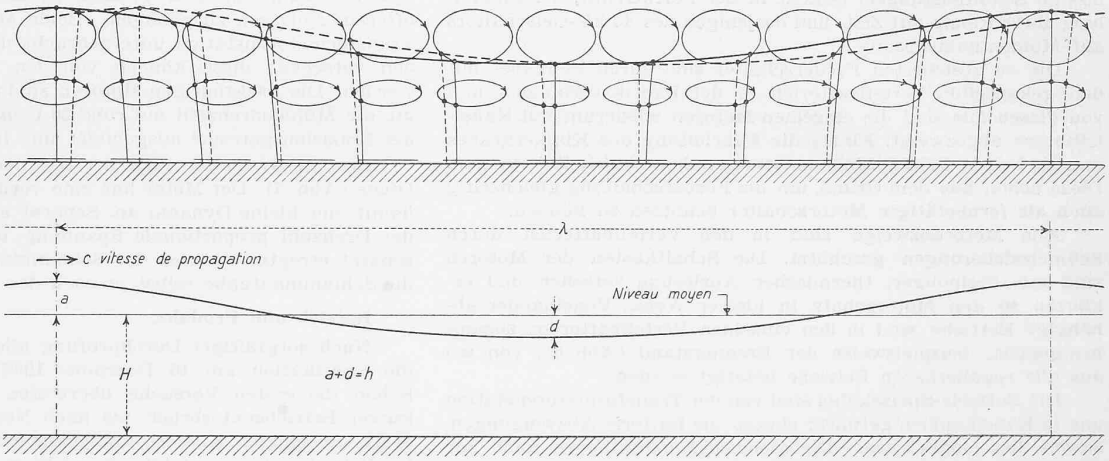

Fig. 9. Ondes par profondeur finie. Solution de Laplace-Airy: les trajectoires des particules sont des ellipses, le rotationnel est différent de zéro.

D'après cette solution, les *trajectoires* des molécules sont des *ellipses* dont le petit axe est vertical et le grand horizontal. Le rapport de ces deux axes décroît de la surface au fond, où il est nul pour satisfaire à la condition que les trajectoires soient horizontales. Le profil de la surface est une *trochoïde elliptique* (Fig. 9). La *vitesse de propagation* est donnée par la formule:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} tah\left(2\pi\frac{H}{\lambda}\right)}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

dans laquelle H représente la profondeur de l'eau, λ la longueur d'onde. Cette vitesse ne dépend pas de la hauteur de la vague.

La houle de Laplace-Airy a donc des *trajectoires fermées*. On établit facilement qu'elle est *rotationnelle*. Elle se confond d'ailleurs avec la solution de Gerstner dans le cas où la profondeur est grande. Elle possède donc, au point de vue de l'hydrodynamique classique, le même défaut que la houle de Gerstner: celui de ne pouvoir être engendrée à partir de la position de repos, puisque son rotationnel n'est pas nul.

Stokes et d'autres mathématiciens ont cherché une solution en admettant l'*irrotationnalité* du mouvement. L'éminent géomètre anglais a trouvé dans cette hypothèse une *solution approchée*, mais c'est à un hollandais, *M. Struik*, que revient le mérite d'avoir donné, dans un mémoire paru également en français dans les «Mathematische Annalen», en 1926, la *solution rigoureuse* du problème de la houle irrotationnelle par profondeur finie. Struik s'est inspiré des méthodes de M. Levi-Civita en utilisant égale-

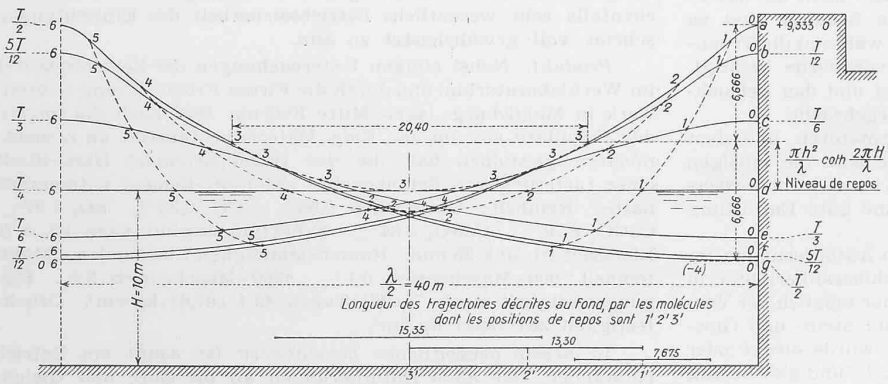

Fig. 11. Clapotis par profondeur finie. Solution de M. Sainflou: profils de la surface aux instants 0, T/12, ... T/2 (———) et trajectoires des particules (- - - - - -).
Houle incidente: $\lambda = 80$ m, $h = 6{,}66$ m, $H = 10$ m.

Solution de M. Sainflou: diagrammes des pressions extrêmes sur une paroi où se réfléchit une houle incidente dont les caractéristiques sont λ, h, H.

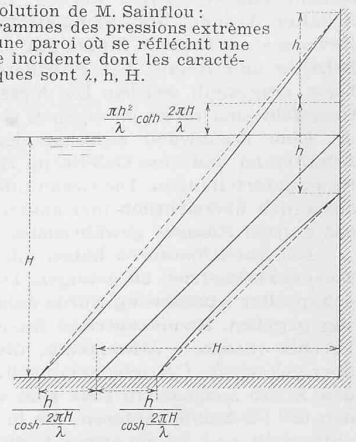

Fig. 12. Clapotis par profondeur finie.

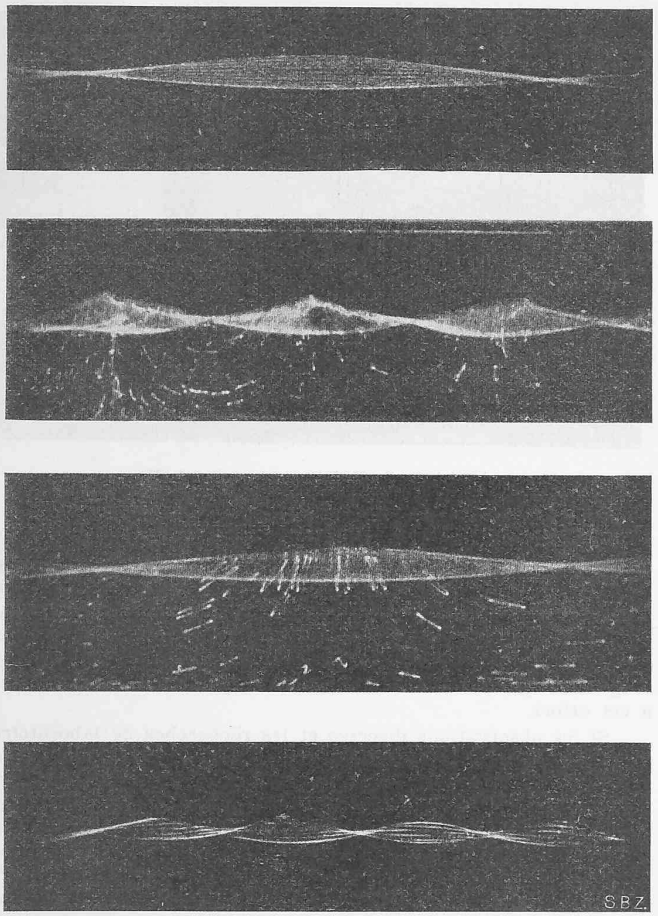

Fig. 13. Expériences de Marey. Profils successifs de la surface et trajectoires des particules de quatre clapotis.

ment la théorie des fonctions d'une variable complexe. Dans sa solution, la vitesse de propagation dépend de la hauteur des vagues. Les trajectoires des particules ne sont pas fermées.

Voyons maintenant *ce qu'enseigne l'expérience.* Nous avons vu qu'il n'existe que peu d'observations soit en mer, soit dans des laboratoires, concernant les ondes de surface (profondeur infinie). Il en est malheureusement de même pour les vagues se propageant dans un bassin de profondeur finie. Les quelques observations et expériences dont on possède les résultats permettent de conclure que la théorie est *en gros* confirmée par l'expérience. La Fig. 10 par exemple, relative à des expériences d'*Ahlborn,* montre que les trajectoires sont à peu près des ellipses, sans toutefois permettre de dire si les courbes sont fermées (théorie de Laplace-Airy) ou ouvertes (théorie de Struik).

Là encore, il est à souhaiter que des laboratoires entreprennent des études expérimentales systématiques de cette importante question.

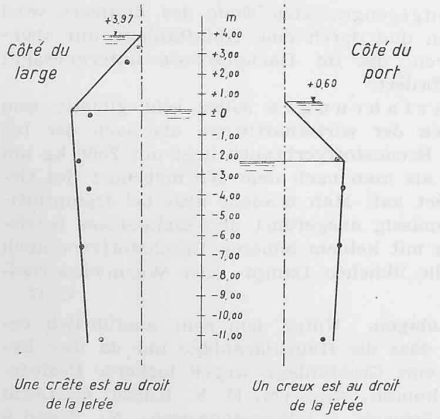

Fig. 15. Comparaison de pressions mesurées à l'aide de quartz-piézoélectriques (points isolés) aux valeurs données par la méthode de M. Sainflou (courbes continues).

JETEE DE MUSTAPHA AU PORT D'ALGER.

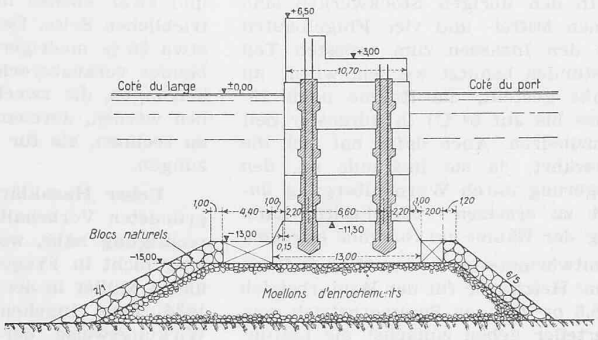

Fig. 14. Profil type de la jetée. — Echelle 1 : 600.

5. Réflexion des vagues sur un ouvrage destiné à barrer leur route.

Lorsque les vagues, en continuant à se propager, rencontrent des profondeurs de plus en plus faibles, leurs crêtes finissent par *déferler.* L'étude de ce phénomène, que chacun a observé sur une plage, est peu avancée. A part une tentative de *Stokes* et une autre toute récente de *Defant,* nous ne connaissons pas d'étude théorique du déferlement. Les observations de ce phénomène sont assez nombreuses, mais très contradictoires. Les seules règles qu'elles permettent d'énoncer sont les suivantes.

Le déferlement se produit lorsque la hauteur des vagues est du même ordre de grandeur que la profondeur de l'eau. Il entraîne la formation d'une réflexion partielle des vagues qui est en général faible. Un fort vent facilite la production du déferlement. Il en est de même d'une décroissance rapide de la profondeur. Ceci explique pourquoi des vagues, même très arrondies, déferlent en arrivant sur une jetée constituée par un plan incliné formant talus. L'eau est alors projetée avec une extrême violence contre la partie supérieure de la jetée qui doit être construite de façon à supporter l'effort.

Si la jetée est formée d'un mur vertical pénétrant suffisamment dans l'eau, les vagues, au lieu de déferler en la rencontrant, sont *réfléchies* par elle. Les deux systèmes d'ondes — réfléchies et incidentes — interfèrent et donnent des ondes stationnaires: c'est le phénomène du *clapotis.* Il a été l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de théorie rigoureuse du clapotis. *Laplace,* dans le mémoire cité plus haut, semble être le premier qui ait trouvé une solution approchée de ce problème. *Boussinesq* en a donné une remarquable, de seconde approximation, mais valable seulement pour une profondeur infinie. C'est à un ingénieur des Ponts et Chaussées, M. *Sainflou,* que l'on doit une généralisation du calcul de Boussinesq au cas de la profondeur finie, qui est précisément celui de la digue à paroi verticale[5]).

D'après Sainflou (Annales des Ponts et Chaussées, 1928), les trajectoires des molécules d'eau ont des supports fixes qui sont des arcs de parabole (Fig. 11)[6]). Cette théorie permet de déterminer à chaque instant la pression de l'eau en un point quelconque de la paroi verticale de la jetée. La Fig. 12 donne les diagrammes des pressions extrêmes.

L'*expérience* semble confirmer d'une façon satisfaisante les résultats de la théorie. La Fig. 13 montre les profils successifs de la surface et les trajectoires des molécules observés par *Marey* dans un bassin d'essai, à l'aide de la méthode chrono-photographique. La Fig. 14 représente le profil de la jetée de Mustapha au Port d'Alger. Ce profil est du type à parement vertical. A la suite d'une tempête exceptionnelle qui a, en provoquant des affouillements, arraché 400 mètres de cette jetée le 3 février 1934, l'Administration des Ponts et Chaussées françaises a effectué, sous la direction de M. l'Ingénieur en chef P. Renaud, d'intéressantes études aussi bien sur la jetée elle-même qu'au laboratoire. En particulier elle a mesuré, à l'aide de quartz-piézoélectriques, la répartition des pressions extrêmes sur le parement d'un secteur de jetée laissé intact par la tempête. Les résultats sont donnés par les points isolés de la Fig. 15, sur laquelle ont été indiquées en traits continus les valeurs calculées d'après la méthode de M. Sainflou. On voit que la concordance est bonne.[7])

Ajoutons que M. *R. Miche* a exposé, dans un mémoire paru en 1933 dans «Science et Industrie», une très intéressante théorie approchée de la houle agissant sur un parement faisant un angle quelconque, mais inférieur à 45°, avec la verticale.

Dans de très nombreux cas pratiques, il n'est pas possible de déterminer par le calcul les pressions dues aux vagues sollicitant un mur de quai ou une jetée. La seule méthode que l'on puisse alors utiliser est l'étude sur modèles réduits. Le laboratoire de Zurich a eu ces dernières années l'occasion de collaborer par cette méthode à l'établissement de différents projets concernant nos lacs suisses.

---

[5]) M. l'Ing. en chef Gourret a publié récemment un mémoire où il développe une nouvelle théorie du clapotis par profondeur finie (Annales des Ponts et Chaussées, 1935).

[6]) Les figures 11 et 12 sont tirées du mémoire de M. Sainflou.

[7]) P. Renaud, «La jetée de Mustapha au Port d'Alger», Annales des Ponts et Chaussées 1935, Nos. IV et V. Les figures 14 et 15 sont tirées de ce mémoire.

Fig. 16. Modèle à l'échelle 1 : 30 du nouveau quai de Vevey. Vue prise au moment où la crête d'une vague arrive sur la caisse-écran (houle incidente : $\lambda = 25$ m, h = 1,50 m).

Fig. 17. Modèle à l'échelle 1 : 30 du nouveau quai de Vevey. Vue prise à l'instant où le creux d'une vague atteint la caisse-écran (houle incidente : $\lambda = 25$ m, h = 1,50 m).

Les Fig. 16 et 17 se rapportent au modèle du nouveau quai de Vevey, dont l'étude a été faite à l'échelle 1 : 30. A la Fig. 16, le quai subit l'assaut de la crête d'une vague, tandis qu'à la Fig. 17, la caisse-écran, destinée à protéger le talus naturel contre les vagues, est atteinte par un creux. La méthode utilisée pour la mesure de la sollicitation du quai consistait à enregistrer les petits déplacements du modèle, suspendu élastiquement. Cette méthode a été décrite en janvier 1933 dans la revue «Schweiz. Bauzeitung» (vol. 101, pag. 29, 48).

Conclusions.

Nous venons d'examiner successivement les différentes étapes que suivent les vagues, depuis leur formation au large par le vent jusqu'à leur réflexion sur les côtes. Nous avons indiqué, pour chacune de ces étapes, en quoi consistent à l'heure actuelle nos connaissances sur le mouvement de l'eau.

On sait très peu de choses de l'action du vent sur la surface d'un liquide, et le problème de la genèse des vagues est loin d'être résolu. Par contre, nous avons vu que nous pouvions suivre assez bien le phénomène depuis le moment où les ondes sont créées jusqu'à celui où elles sont réfléchies par un obstacle. Et c'est principalement aux recherches théoriques que nous le devons. Lorsqu'on consulte les nombreux mémoires se rapportant au domaine des vagues, on ne peut s'empêcher d'être saisi d'admiration par l'énorme effort qu'ont dû déployer les mathématiciens pour arriver au résultat actuel. C'est un devoir aussi bien pour l'ingénieur que pour l'officier de marine que de rendre hommage à cet effort.

Si les observations directes et les recherches de laboratoire n'ont pas contribué à l'avancement de cette question dans la mesure où elles l'ont fait pour d'autres domaines de la science, c'est qu'il s'agit d'un phénomène non-permanent dont l'étude expérimentale est des plus délicates. La plupart de ces recherches, ou bien se sont bornées à n'étudier que certaines caractéristiques du phénomène — vitesse de propagation, période, longueur et hauteur des vagues — ou bien représentent des cas isolés. Il faut souhaiter que le côté expérimental de la question soit un jour étudié d'une façon complète et systématique, en abordant le problème d'après un programme d'ensemble où l'étude de laboratoire viendrait compléter heureusement l'observation de la nature.

Zurich, le 25 avril 1936.

MITTEILUNGEN

Luftheizung für kleinste Wohnräume. Um die Baukosten des Münchner Ledigenheimes auf ein Mindestmass zu beschränken, hat man dessen Einzelzimmer mit einem Rauminhalt von nur etwa 14 m³ bemessen. Die künstliche Lüftung solcher Räume, die beträchtlich unter das von Hygienikern aufgestellte Mindestmass gehen, ist unbedingt nötig; umsomehr als hier mit besonders schlechten Luftverhältnissen zu rechnen war, da die Insassen, meist Arbeiter, ohne ausreichende Reinigungsmöglichkeit ihr Heim aufsuchen müssen. Auf Grund eingehender Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen kam man zur Ausführung einer Dampfluftheizung, durch die in etwas neuartiger Weise die Heizung und Lüftung gleichzeitig durchgeführt werden kann. Ueber die Betriebsergebnisse, die ein Urteil über diese neue Anwendungsmöglichkeit der Luftheizung zulassen, berichtet F. Derigs im «Gesundheitsing.» Bd. 58, Nr. 23.

Das Gebäude enthält im Erdgeschoss die gemeinschaftlichen Tagesräume, Bureaux, Wirtschaftsräume und Läden; im Keller sind neben den Kessel- und Heizanlagen noch Bäder, Wasch- und Trockenräume. In den übrigen Stockwerken sind die 420 Einzelzimmer auf einen Mittel- und vier Flügelbauten verteilt. Da die Zimmer von den Insassen zum grössten Teil nur während weniger Abendstunden benutzt werden, wurde an die Heizung noch die Aufgabe gestellt, die Räume nach 19-stündiger Abkühlung (teilweise bis auf 5° C) in kürzester Zeit wieder auf 18 bis 20° C hochzuheizen. Auch dafür hat sich die Dampfluftheizung bestens bewährt, da sie imstande ist, den kalten Luftinhalt ohne Verzögerung durch Wärmeübergang unmittelbar durch warme Luft zu ersetzen. Gleichzeitig kann durch die Anlage die Kühlung der Räume im Sommer erfolgen.

Zur Deckung eines Gesamtwärmebedarfs von 954 000 Cal/h sind 4 Strebelkessel mit je 34 m² Heizfläche für den Winterbetrieb und ein fünfter Kessel mit 15,5 m² für den Sommerbetrieb vorhanden. Von einem Dampfverteiler gehen zunächst die Leitungen zur Heizung aller Gemeinschafts- und Nebenräume ab, die durchwegs mit Niederdruckdampf geheizt werden, ebenso zur Versorgung der Desinfektions- und Warmwasserbereitungsanlage. Der für die Luftheizung notwendige Dampf wird den Heizkammern zugeführt, wo die über Dach entnommene und durch Betonkanäle zugeführte Frischluft, nach der Reinigung durch einen Zellenluftfilter, in einem Lamellenlufterhitzer auf etwa 60° C erwärmt wird. Den Transport der Luft durch Blechkanäle zu allen Teilen des Gebäudes bewirken die in jeder der fünf Heizkammern befindlichen Ventilatoren, die zur Verhinderung der Schwingungen über elastische Segeltuchverbindungen mit den Blechkanälen verbunden sind. Die Warmluft wird den Zimmern unmittelbar neben oder unter dem Fenster zugeführt; Lenkbleche im Austrittskasten sorgen für gleichmässige Verteilung, während durch verstellbare Jalousien und Schlitzschieber die ausströmende Warmluftmenge beliebig geregelt werden kann. Am entgegengesetzten Ende des Zimmers wird die Abluft entnommen und durch eine Abluftanlage mit ebenfalls fünf Ventilatoren, die im Dachgeschoss untergebracht sind, nach aussen befördert.

Die Betriebserfahrungen sollen sehr günstig sein und zwar ebenso nach der wirtschaftlichen als nach der betrieblichen Seite. Der Brennstoffverbrauch liegt mit 2500 kg um etwa 20 % niedriger, als man nach dem Wärmebedarf des Gebäudes vorausberechnet hat. Man braucht also bei Dampfluftheizungen, die zweckmässig ausgeführt und sachgemäss betrieben werden, durchaus mit keinem höheren Brennstoffverbrauch zu rechnen, als für die üblichen Dampf- oder Warmwasserheizungen. W. G.

Ueber Hauskläranlagen. Unter dem sehr ausführlich begründeten Vorbehalt, dass die Hauskläranlage nur da ihre Berechtigung habe, wo eine Grossanlage wegen lockerer Besiedelung nicht in Frage kommt, wird von H. F. Kuisel, G. Lüthi und J. Müller in der «Schweiz. Z. f. Strassenwesen», Nr. 8 und 9 1936, eine eingehende Darstellung der Konstruktion und der Wirkungsweise der beiden Formen von Hauskläranlagen — Faulkammergrube und Frischwassergrube — gegeben.